

Jan Löser, Stefan Hellfritsch, Sebastian Weigl, Ronald Wilhelm und Marco Klemm

Oxyfuel-Technologie: Von der Grundlagenforschung zum Großkraftwerk mit CO₂-Abscheidung

1 Grundlagen

„Strom kommt aus der Steckdose“ – an dieser manifestierten Denkweise wird sich trotz hitzig geführter Energiedebatten wohl langfristig nichts ändern. Gerade deshalb ist der verantwortungsvolle Umgang mit der mühsam erzeugten Energieform „elektrischer Strom“ eine vordringliche Aufgabe von Wissenschaft, Wirtschaft und Gesellschaft. Außerdem stehen die Stromerzeuger und Versorgungsunternehmen unter dem Druck, preiswerten und umweltfreundlichen Strom mit einer hohen Versorgungsqualität zur Verfügung zu stellen. In Deutschland wird dabei mittelfristig die hier heimische Braunkohle ihren festen Platz behalten und ein preiswerter und zuverlässig verfügbarer Energieträger bleiben.

Die Anforderung an eine fortführende Nutzung der Ressource Braunkohle ist der verantwortungsvolle und umweltschonende Umgang mit ihr. Ziel ist eine effiziente Nutzung der Brennstoffenergie sowie eine Abtrennung und Lagerung der klimawirksamen Komponenten (hauptsächlich des Kohlendioxids) aus dem Rauchgas. Diese Komponenten werden derzeit noch fast vollständig an die Umgebung abgegeben. Die effiziente Nutzung des Brennstoffs Braunkohle wird heute durch verschiedene moderne Prozesse im Kraftwerk erreicht, sodass der Nettowirkungsgrad eines Braunkohlengroßkraftwerkes bei 42 bis 43 % liegt. Weitere Effizienzsteigerungen sind etwa durch die Brennstofftrocknung (Trockenbraunkohle)

und die Erhöhung der Prozessparameter (700 °C-Kraftwerk) zu erreichen und stellen einen Weg zur Senkung der CO₂-Emissionen dar. In Zukunft soll das bei der Verbrennung entstehende Kohlendioxid aus den Kraftwerksrauchgasen klimaunwirksam gesammelt und gespeichert werden, was beispielsweise durch Verpressen in alte Erdöl- und Erdgaslagerstätten oder in Tiefengesteine geschehen kann. Das Prinzip ist vereinfacht in Bild 1 dargestellt.

Ein Zahlenbeispiel soll die Größenordnung der anfallenden Stoffströme am Beispiel des Heizkraftwerks Schwarze Pumpe (vgl. Bild 11) verdeutlichen: Dort werden bei einer elektrischen Leistung von 1600 MW_{el} 1500 t/h Rohbraunkohle verbraucht und 1600 t/h Kohlendioxid emittiert. Auf dem Weg zum „CO₂-freien Kraftwerk“ kann eine mögliche Übergangslösung für bestehende Kraftwerke die Abtrennung des Kohlendioxids aus dem Rauchgas mittels sogenannter selektiver Wäschen sein. Diese funktionieren unter Ausnutzung der Effekte der physikalischen und/oder chemischen Absorption. Als Restgase verbleiben dann Stickstoff und Wasserdampf. Der Vorteil liegt darin, dass kaum Eingriffe in den herkömmlichen ausgereiften Kraftwerksprozess vorgenommen werden müssen. Am Ende der Rauchgaskette muss lediglich eine Waschanlage neu hinzugefügt werden. Bedenklich sind jedoch die Dimensionen einer solchen Anlage, durch die am Beispiel Schwarze Pumpe immerhin 6,7 Mio. m³ Rauchgas pro Stunde geschleust werden

Das „CO₂-freie“ Kraftwerk ist in den Medien ein viel strapaziertes Schlagwort. Dieser Beitrag zeigt, welche Anstrengungen derzeit unternommen werden, um das Hauptreaktionsprodukt der Braunkohlenverbrennung, das Kohlendioxid, nicht in die Atmosphäre abzugeben, sondern es für eine unterirdische Lagerung aufzubereiten, welche Strategien dabei verfolgt und Technologien bemüht werden müssen und dass „CO₂-frei“ noch lange nicht CO₂-frei ist.

Erforschen, Beherrschen und Gestalten von Verbrennungsvorgängen mit reinem Sauerstoff, Nachempfinden mittels Simulation, Behandlung und Reinigung der dabei entstandenen Rauchgase und die Zusammenführung dieser Teilschritte zu einer stimmigen, effektiven Prozesskette sind Aufgaben, die es unter der Maßgabe der Sicherung eines bezahlbaren Strompreises zu lösen gilt.

The 'CO₂-free' power station is a frequently encountered keyword in the media. This paper highlights the efforts which are being undertaken at TU Dresden to avoid carbon dioxide emissions into the atmosphere and, instead, to store it safely under ground. The handling of combustion with pure oxygen, simulation of the processes and cleaning of the exhaust gases are steps which need to be linked into a functional process chain for further evaluation. It is shown that this research is necessary in order to keep 'CO₂-free' electricity affordable.

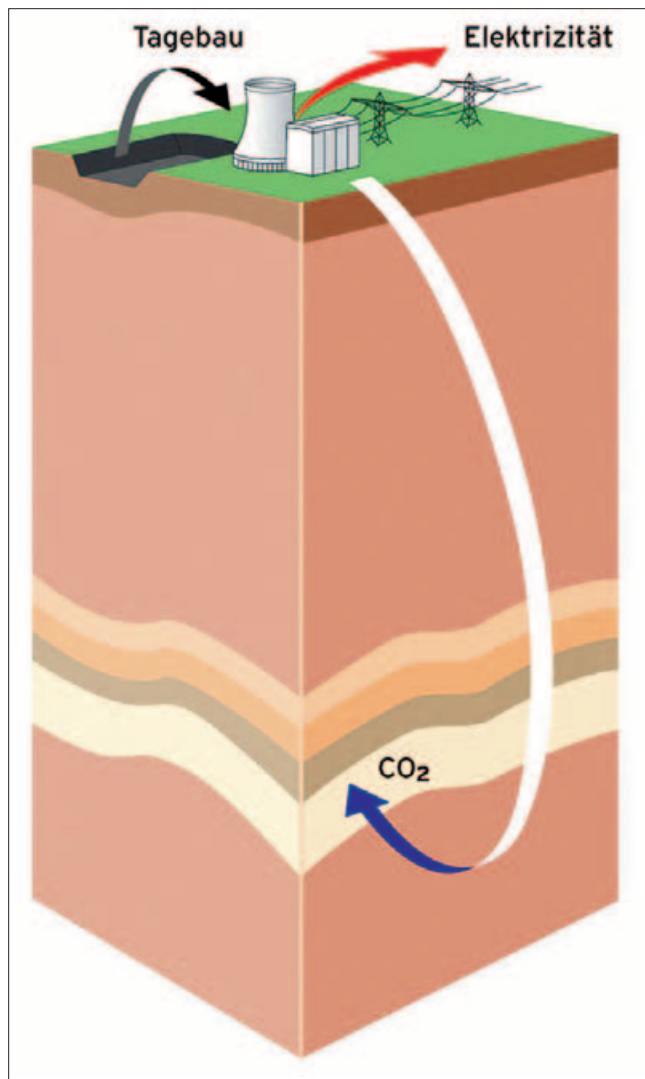


Bild 1. Kohlenstoffkreislauf im „CO₂-freien“ Kraftwerk
(Quelle: Vattenfall)

müssten. Um aber die gesetzten Zielstellungen im Klimaschutz zu erreichen, müssen andere Wege gegangen werden.

Ein vielversprechender Weg ist die Verbrennung der Braunkohle mit reinem Sauerstoff, die sogenannte Oxyfuel-Verbrennung. Sie ist Gegenstand der Forschung an der Professur für Kraftwerkstechnik der TU Dresden. In modernen Kohlekraftwerken soll Braunkohle künftig nicht mit Luft, sondern mit reinem Sauerstoff verbrannt werden. Dadurch entsteht hoch konzentriertes Kohlendioxid als Rauchgas, das weniger aufwändig aufbereitet und unterirdisch gelagert werden kann.

2 Neue Erkenntnisse zur Oxyfuel-Verbrennung von Braunkohle

Um die Oxyfuel-Technologie auch in großem Maßstab, also in Kohlekraftwerken herkömmlicher Leistung nutzen zu können, sind eine Reihe von Forschungsarbeiten notwendig, die die Grundlagen zum sicheren Beherrschen dieser Technologie und der einer solchen Verbrennung nachgeschalteten Energiewandlungs- und Rauchgasreinigungsprozesse zum Ziel haben.

2.1 Staubfeuerungsversuchsanlage

Die Verbrennung von Kohle basiert maßgeblich auf einer Reaktion von Kohlenstoff mit Sauerstoff. Die bei diesem Prozess frei werdende Energie wird in Form von Wärme abgegeben. Mit dieser Wärme wird im Kraftwerksprozess Wasser zu Wasserdampf erhitzt. Dieser wird in einer Dampfturbine entspannt. Die Rotationsenergie wird in einem Generator in elektrischen Strom umgewandelt. Das Reaktionsprodukt aus Kohlenstoff und Sauerstoff ist hauptsächlich gasförmiges Kohlendioxid. Bei der Verbrennung von Kohle mit Luft nimmt der inerte Stickstoff, mit 79 Vol.-% der Hauptbestandteil der Luft, nicht an der Reaktion teil. Damit kommt es bei einer technischen Verbrennung je nach Kohletyp zu einer maximalen Konzentration von 17 bis 20 % Kohlendioxid im Rauchgas. Der Rest sind Spurengase, Wasserdampf und der Luftstickstoff, der nicht an der Reaktion teilnimmt. Der Verbrennung wird mehr Sauerstoff zur Verfügung gestellt als rechnerisch notwendig ist, damit alle Kohlepartikel einen Reaktionspartner finden und möglichst vollständig umgesetzt werden. Um das Kohlendioxid aus dem Rauchgasgemisch (Stickstoff mit Kohlendioxid) zu entfernen, sind verschiedene verfahrenstechnisch aufwendige Rauchgas-Waschverfahren erforderlich. Aus diesem Grund soll beim Oxyfuel-Prozess der Luftstickstoff von vornherein ausgeschlossen werden.

Beim Oxyfuel-Prozess, der in Bild 2 dargestellt ist, wird die Kohle mit reinem Sauerstoff verbrannt. Dabei erhöht sich nicht die Menge an erzeugtem Kohlendioxid, sondern das CO₂ wird im Rauchgas konzentriert, d. h., die verdünnende Wirkung des Stickstoffs fehlt. Wie in Bild 3 zu sehen ist, verringert sich bei der Verbrennung von Kohle nach dem Oxyfuel-Prinzip das gesamte Rauchgasaufkommen deutlich. Für die Bereitstellung von technischem Sauerstoff für die Verbrennung wird Luft in einer Luftzerlegungsanlage separiert. In der Brennkammer wird Kohle mit Sauerstoff zur Reaktion gebracht. Die dabei entstehende Wärme wird mit Hilfe von Wärmeübertragern aus dem Prozesskreislauf ausgeschleust. Die Verbrennung von Kohle mit reinem Sauerstoff führt zu kleinen hellen Flammen hoher Energiedichte und Temperatur. Heute übliche verfügbare Brennkammer- und Wärmeübertragermaterialien werden damit wesentlich überlastet. Um das zu vermeiden, werden bereits ausgekühlte Rauchgase entstaubt und wieder in den Prozess zurückgeführt, d. h., sie werden rezirkuliert. Dabei wird die Flammentemperatur und -größe geregelt und eine technisch beherrschbare und sinnvolle Verbrennungstemperatur eingestellt.

Nach der Verbrennung und Abkühlung der Rauchgase im Kessel erfolgt die Abscheidung der Asche in einem Filtersystem. Der Wasserdampf und das Schwefeldioxid – beide entstammen im Wesentlichen dem Brennstoff – werden in zwei weiteren Prozessschritten abgetrennt. Danach besteht das Rauchgas fast vollständig aus Kohlendioxid. Der gesamte Kohlendioxidstrom könnte verdichtet und klimaanwirksam gelagert werden. Somit ist dieses Verfahren nicht „kohlendioxidfrei“, sondern ein Prozess, in dem ein reiner Kohlendioxidstrom erzeugt wird, der dann einfacher und energetisch sinnvoll gebündelt nicht in die Erdatmosphäre abgegeben wird.

An der TU Dresden wurde im Rahmen des Forschungsprojektes ADECOS an der Professur für Kraftwerkstechnik eine Versuchsanlage mit 50 kW Feuerungsleistung (Bild 4) errichtet, in der Braunkohlenstaub nach dem Oxyfuel-Prinzip mit reinem Sauerstoff verbrannt werden kann. Im dabei entstehenden Rauchgas werden Kohlendioxidkonzentrationen von bis zu 95 % erzielt. Die restlichen

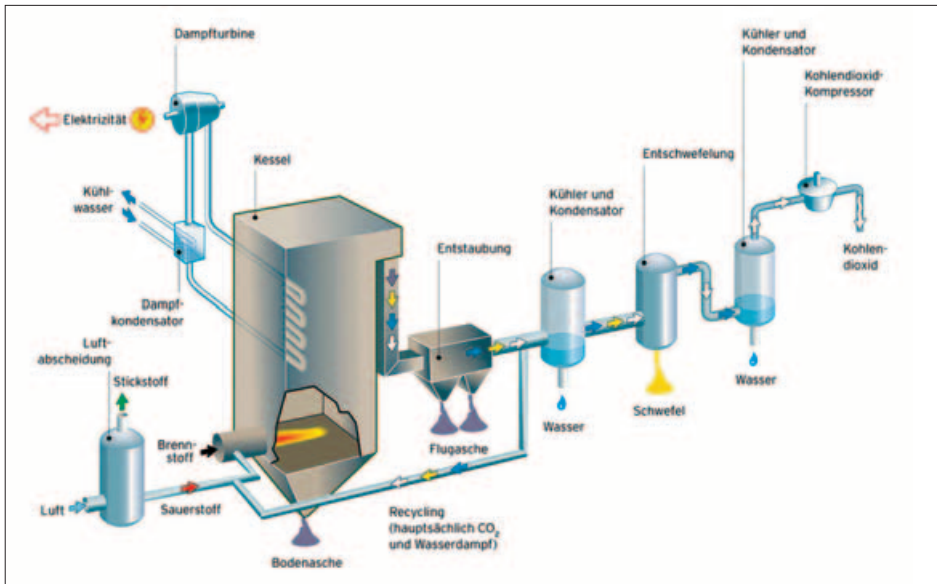


Bild 2. Darstellung eines Kraftwerksprozesses nach dem Oxyfuel-Prinzip (Quelle: Vattenfall)

Komponenten sind Schwefelverbindungen, Kohlenmonoxid, Stickoxide und Restsauerstoff, wie sie je nach Brennstoff in jeder technischen Verbrennung vorkommen. Die Anlage ermöglicht einen stufenlosen Übergang von der Kohleverbrennung mit Luft zur Kohleverbrennung nach dem Oxyfuel-Prozess und bildet somit im Technikumsmaßstab einen „kohlendioxidfreien“ Kraftwerksprozess ab. Die Versuchsanlage erlaubt die Verbrennung verschiedenster staubförmiger Brennstoffe auf Basis von Trockenbraunkohle, also auch von Gemischen. Der Sauerstoffanteil der Verbrennungsluft kann individuell eingestellt und während der Versuche auch verändert werden. Die Charakteristik des Kohlestaubbrenners, eine Eigenentwicklung der Professur für Kraftwerkstechnik, ist hinsichtlich Primär- und Sekundärluft sowie zusätzlicher Sauerstoffeindüisungen veränderbar.

2.2 Simulation der Verbrennungsvorgänge in der Staubfeuerungsversuchsanlage (SVA)

Parallel zu den experimentellen Untersuchungen erfolgen Modellierung und numerische Simulation der Verbrennungsvorgänge. Die Simulation ermöglicht es, mittels sogenannter „virtueller Experimente“ schnell, gezielt und risikolos verschiedene, auch kritische Betriebszustände nachzubilden. Ziel ist vor allem die Untersuchung der Brennkammer hinsichtlich der Temperatur-, Geschwindigkeits-, Druck-, Partikel- (Bild 5) und Speziesverteilung (Verteilung der einzelnen Gaskomponenten) im Versuchsreaktor. Die Ergebnisse der Simulation sind anhand der Versuchsdaten der Staubfeuerungsversuchsanlage zu validieren.

Die numerische Strömungssimulation (Computational Fluid Dynamics/CFD) beruht auf der Lösung der Erhaltung- bzw. Transportgleichungen für die Masse, den

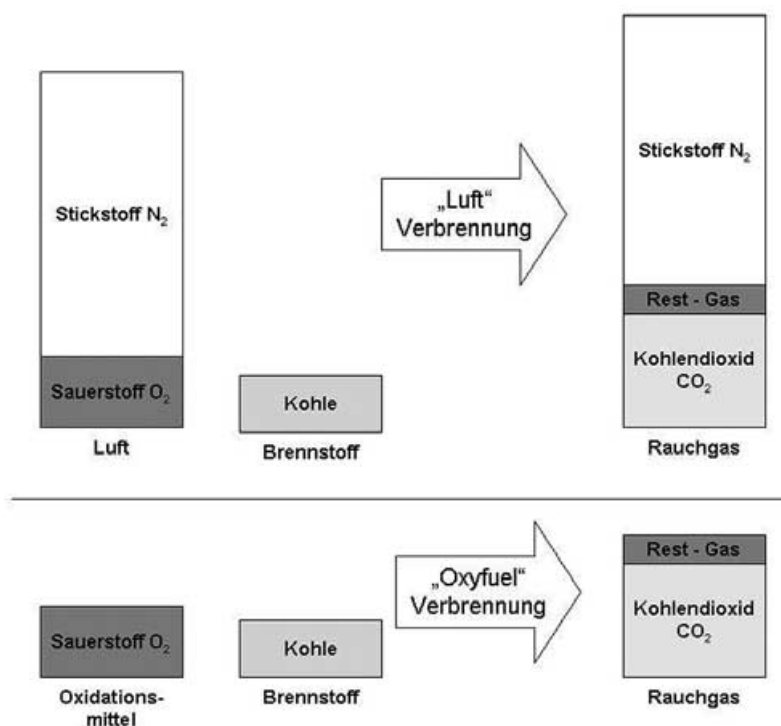


Bild 3. Schematischer Vergleich der Verbrennung von Kohle mit Luft und der Reaktion nach dem Oxyfuel-Prinzip

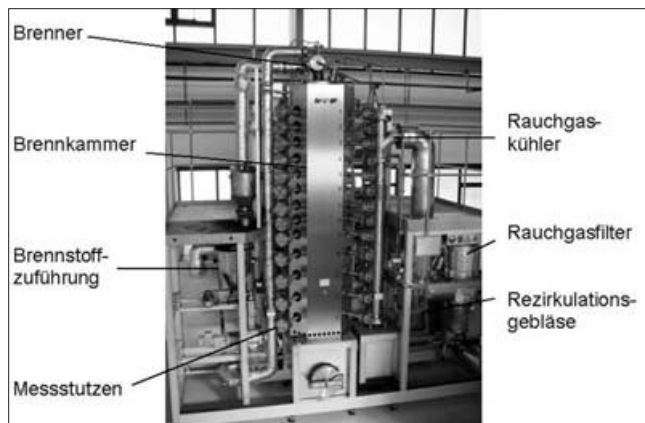


Bild 4. Staubfeuerungsversuchsanlage 50 kW

Impuls, die Energie und verschiedene Speziesmassenbrüche. Dazu wird das kommerzielle CFD-Programm FLUENT® verwendet. Für die Modellierung ist ein 3-D-Geometriemodell erstellt worden, das die Brennercharakteristik und die Brennkammer der Staubfeuerungsversuchsanlage nachbildet. Das Geometriemodell wird in einem zweiten Schritt mit einem speziellen Programm (Gambit®) vernetzt, d. h., das Gesamtvolumen wird in viele kleine Volumina aufgeteilt, wie in Bild 5 angedeutet. Das ist notwendig, da die Strömungssimulation auf der sogenannten „finite volume method“ basiert. Die Transportgleichungen werden gegebenenfalls unter Berücksichtigung der Turbulenz für jedes einzelne Teilvolumen integriert und gelöst.

Die Aufgabe der Simulation besteht darin, den Verbrennungsprozess nach dem Oxyfuel-Prinzip zu beschreiben und mit den Erkenntnissen den Prozess zu optimieren. Dazu ist es notwendig, analog dem Versuchsprogramm die verschiedenen Sauerstoffkonzentrationen im Brennraum und den Vergleichsfall mit Luft nachzubilden. Die für die einzel-

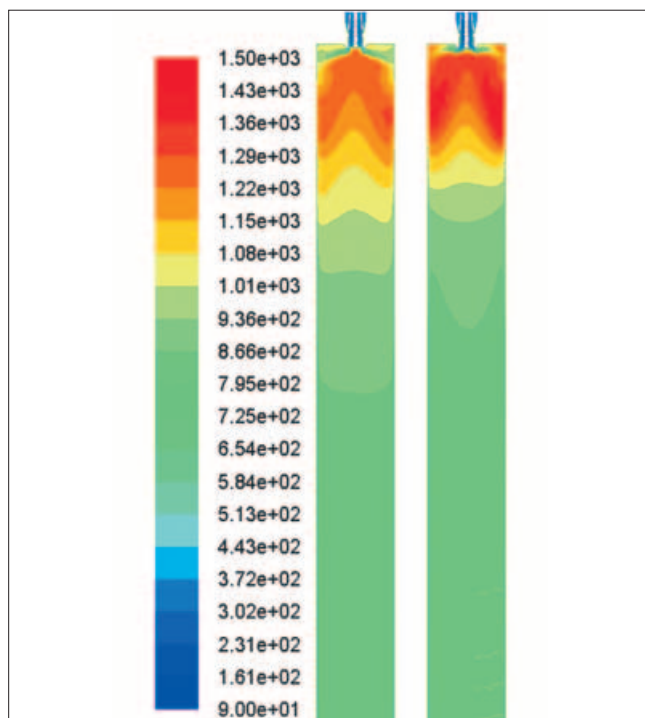


Bild 6. Temperaturprofile (°C) – links Luftverbrennung, rechts Oxyfuel-Verbrennung

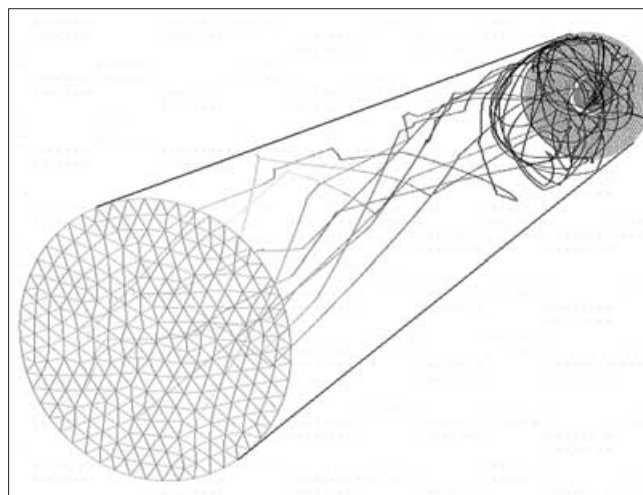


Bild 5. 3-D-Modell der schlanken zylindrischen Brennkammer mit dargestellten Flugbahnen einiger aus dem Drallbrenner ausströmender Braunkohlenpartikel (Flugrichtung auf den Betrachter zu); im Vordergrund: Darstellung des Netzes über dem Querschnitt

nen Versuchspunkte verwendeten Parameter sind als Randbedingungen für die Simulation zu setzen. Hierzu zählen hauptsächlich die Geschwindigkeit, die Zusammensetzung und die Temperaturen der zugeführten Gas- und Feststoffphasen (Oxidationsmittel, Inertgas, wie Luftstickstoff oder rezirkuliertes Rauchgas, und Kohle) am Brenner-eintritt.

Die Simulation wird mit den vorhandenen Modulen des Programms Fluent durchgeführt. Das Strömungsfeld wird mit dem Standard- κ - ϵ -Modell berechnet, das auf „Reynolds-Averaged-Navier-Stokes“ (RANS) Gleichungsmodellen beruht. Für die Berechnung der Reaktionen in der Gasphase wird das „Eddy-Dissipations-Modell“ verwendet. Mit dem „Diskrete-Phase-Modell“ (DPM) wird die Kohle als disperse Partikelpase entsprechend des LAGRANGE-Ansatzes modelliert und mit der Gasphase gekoppelt. Der Strahlungseinfluss wird durch das „P1-Modell“ wiedergegeben.

In Bild 6 ist exemplarisch die berechnete Temperaturverteilung über dem Reaktor dargestellt. Im oberen Teil der Brennkammer entstehen erwartungsgemäß die höchsten Temperaturen, die Verbrennung findet überwiegend hier statt. Der Vergleich zwischen Luft- und Oxyfuel-Feuerung zeigt, dass bei Oxyfuel-Feuerungen mit höheren Temperaturen zu rechnen ist. Die Höhe der Temperaturen ist abhängig von der gewählten Rezirkulationsrate der Rauchgase im Oxyfuel-Betrieb und der damit vorhandenen Sauerstoffkonzentration am Brennkammereintritt. Die Geschwindigkeit der Gasphase in Abströmrichtung (axial) ist in Bild 7 dargestellt. Die unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten am Brennkammereintritt zeigen den Einfluss des Drallbrenners auf die Turbulenz in der Gasphase. Die optimale Vermischung von Oxidationsmittel und Kohlepartikel soll so gewährleistet werden, um einen möglichst hohen Umsatz der Kohle zu erreichen. Die absoluten Strömungsgeschwindigkeiten im Oxyfuel-Betrieb sind im dargestellten Fall etwas geringer als bei der Luftfeuerung, dadurch haben die Kohlepartikel eine längere Verweilzeit in der Brennkammer und können so besser umgesetzt werden.

2.3 Rauchgasbehandlung

Wird der Rauchgasstrom aus Kraftwerken heute meist noch gereinigt und mit Wasserdampf gesättigt über die Kühltürme

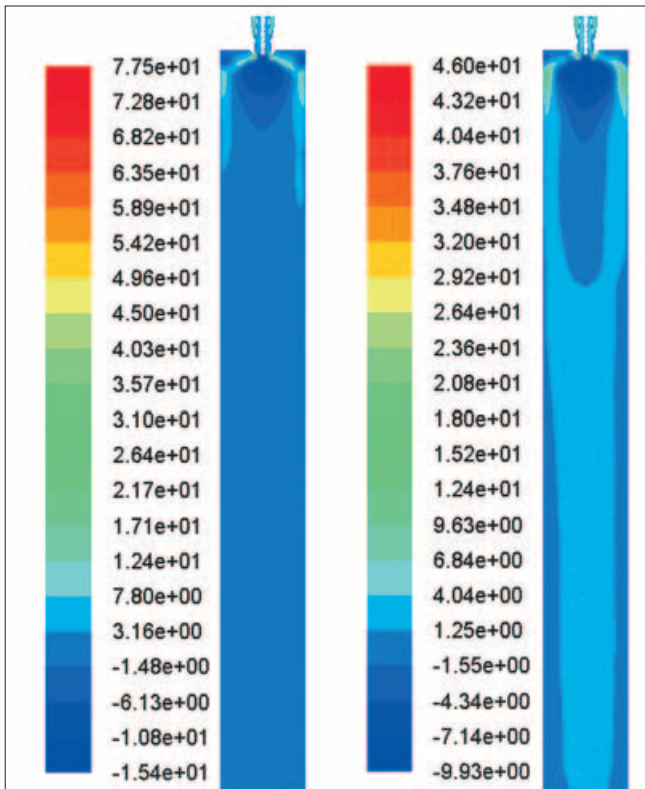


Bild 7. Axialgeschwindigkeiten (m/s) – links Luftverbrennung, rechts Oxyfuel-Verbrennung (exemplarisch)

der Atmosphäre übergeben, so wird sich das in neuen Kraftwerkskonzepten entscheidend ändern. Die Anforderungen von Verdichtung, Transport und Lagerung an die Rauchgase aus kraftwerkstechnischen Anlagen erfordern ebenfalls eine Reinigung. Besonders im Hinblick auf die Korrosion der Apparate, des Leitungsnetzes und der Stabilität der unterirdischen Einlagerung besteht Handlungsbedarf.

Ziel der Oxyfuel-Verbrennung ist es, einen CO_2 -Strom technischer Reinheit zu erzeugen. Das Rauchgas enthält im Oxyfuel-Prozess kaum mehr verdünnenden Stickstoff, dadurch sind Schadstoffe wie Schwefeldioxid deutlich höher konzentriert. Die Menge an Stickoxiden (NO_x) ist durch den fehlenden Luftstickstoff deutlich gemindert. Des Weiteren sind vor allem Kohlendioxid und Wasserdampf vorhanden. Um die Oxyfuel-Abgase zu reinigen, ist neben der Trocknung und Entstaubung vor allen Dingen die Entschwefelung von entscheidender Bedeutung. Die höhere Schwefeldioxidkonzentration im Rauchgas und die prozessbedingte Anforderung, das Rauchgas für Transport und Lagerung hoch zu verdichten oder zu verflüssigen, stellt neue Ansprüche an den Reinigungsprozess, eröffnet aber auch völlig neue Ansätze der Gasaufbereitung.

Bezüglich der Rauchgasreinigung in konventionellen Kohlekraftwerken existieren eine Reihe von Erfahrungen. Eine große Zahl von Verfahrensprinzipien und Gestaltungsvarianten wurde in realer Größe im Regelbetrieb getestet. Dabei ergab sich, dass für Kraftwerksblöcke großer Leistung (ab 100 MW_{el}) Nasswäschen (Bild 8) mit Kalksteinsuspension als Waschmittel und dem Produkt Gips ein gewisses Optimum darstellen. Das im Rauchgas enthaltene Schwefeldioxid wird dabei durch eine Reaktion mit Kalkstein, der feingemahlen in Wasser aufgeschlämmt ist, entfernt. Diese Suspension wird im Inneren eines

Waschturmes in mehreren Ebenen fein verteilt von oben nach unten gesprüht, während die Rauchgase in entgegengesetzte Richtung strömen und dabei in intensiven Kontakt treten. Aus chemischer Sicht läuft dabei folgende, vereinfacht dargestellte Reaktionskette ab: Das Schwefeldioxid wird im Wasser gelöst und reagiert mit diesem zu Sulfid- und Hydrogensulfitionen (negativ geladen). Im Suspensionswasser liegt durch den Kalkstein ein gewisser Anteil Kalziumionen (positiv geladen) und Karbonationen vor. Die Karbonationen werden durch die Sulfitionen verdrängt. Bei ihrer Zersetzung bildet sich Kohlendioxid, das in das Rauchgas entweicht. Kalziumionen und Sulfitionen bilden Kalziumsulfid. Dieses wird in einem Folgeprozess im Waschturmsumpf oxidiert, sodass als Produkt eine Kalziumsulfat-Suspension (Gips) entsteht. Der Gips ist nach Entwässerung und Trocknung in gewissem Umfang technisch weiterverwendbar. Das den Waschturm verlassende Rauchgas erfüllt die gesetzlichen Anforderungen der Großfeuerungsanlagenverordnung (13. BImSchV), was bedeutet, dass pro Kubikmeter Rauchgas noch 100 bis 200 mg Schwefeldioxid enthalten sind. Das entspricht einer Entschwefelungsquote von 95 bis 98 %. Im Braunkohlenkraftwerk Schwarze Pumpe werden mit diesem Verfahren zum Beispiel pro Stunde 38 t Kalkstein verbraucht. Damit werden 12 t Schwefeldioxid aus dem Rauchgas absorbiert, 66 t Gips produziert und 8 t CO_2 (als Reaktionsprodukt der Verdrängungsreaktion) emittiert.

Gemeinhin gilt dieses erprobte Verfahren nun auch als Favorit für die Reinigung der Rauchgase nach der Verbrennung von Braunkohle mit reinem Sauerstoff. Nur sind die vielfältigen Effekte der Zusammensetzung des Oxyfuel-Rauchgases in einem solchen Wäscher noch nicht abschließend geklärt. Die Arbeit an der Professur für Kraftwerkstechnik hat gezeigt, dass die Geometrie dieser Wäscher, damit auch indirekt die Verweilzeit des Rauchgases darin, der Waschvorgang und die Technologie selbst – Fernhalten von Luftstickstoff und trotzdem Nutzung des in der Luft enthaltenen Sauerstoffs zur Oxidation von Kalziumsulfid zu Gips – einen erheblichen Forschungsbedarf aufzeigen, bevor an eine erfolgreiche, großtechnische Industrieanwendung zu denken ist. Die sehr strengen Grenzwerte für Fremdstoffe im einzulagernden Kohlendioxid erfordern außerdem eine weitere Verbesserung des Entschwefelungsgrades solcher Anlagen.

Nach der Entschwefelung muss das Rauchgas noch getrocknet werden. Es kann als ein hinreichend reiner Kohlendioxid-Gasstrom bezeichnet werden und wird anschlie-

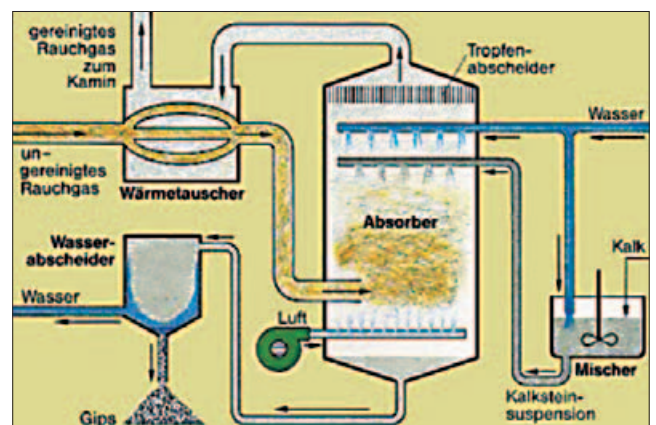


Bild 8. Prinzipdarstellung des klassischen Waschverfahrens mittels Kalksteinsuspension (Quelle: Cornelsen Verlag)

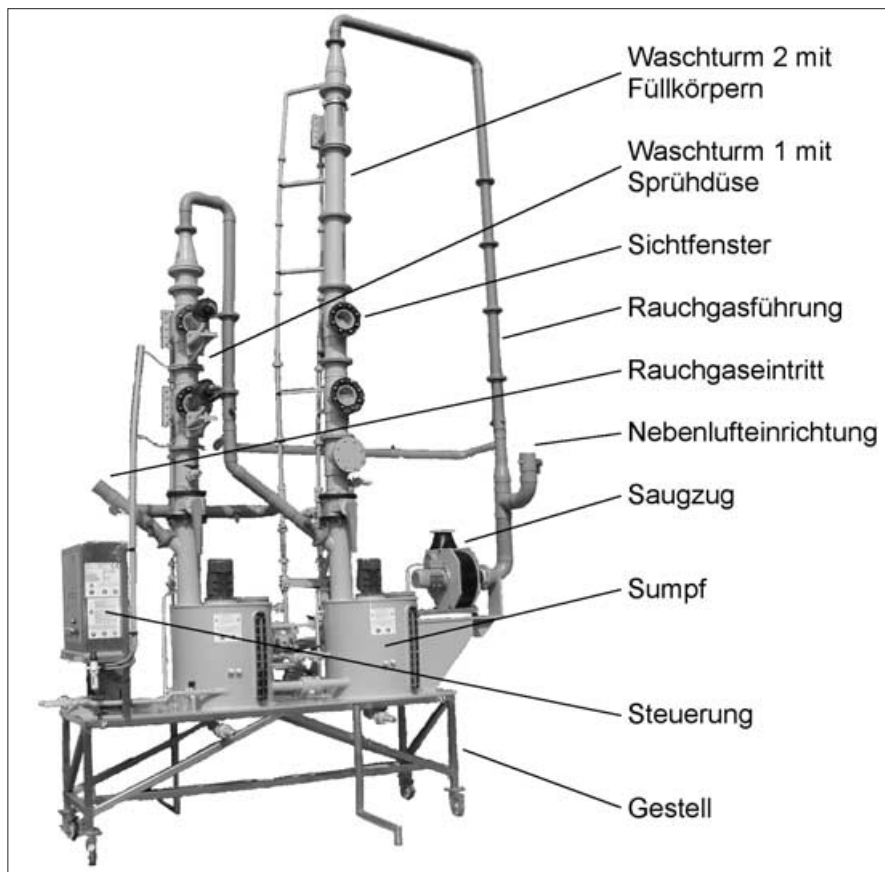


Bild 9. Modular aufgebauter Versuchswäscher

ßend verdichtet und verflüssigt. Um die genauen Aus- und Wechselwirkungen des Oxyfuel-Rauchgases mit Kalksteinsuspensionen und anderen möglichen Waschmitteln verschiedener Konzentration untersuchen zu können, wurde im Jahr 2006 an der Professur für Kraftwerkstechnik der TU Dresden ein modular aufgebauter Versuchswäscher (Bild 9) entwickelt und gebaut. Damit ist es möglich, verschiedene Wäschertypen, deren Modifikationen und Verschaltungen passend zur Staubfeuerungsversuchsanlage nachzuempfinden.

Im Gegensatz zur herkömmlichen Methode der Nasswäsche bieten die Erfordernisse von Trocknung und anschließender Verflüssigung durch Verdichtung und Kühlung völlig neue Ansätze für andere Reinigungs- bzw. Separationstechnologien. Im Falle des Rauchgases bei der Oxyfuel-Verbrennung liegt eine flüssige Mischung aus überwiegend Kohlendioxid, Schwefeldioxid und physikalisch gelöstem, gasförmigen Stickstoff und Sauerstoff vor. Ein solcher völlig neuer Ansatz besteht in der Destillation dieses Gemisches. Die Destillation ist in etwas veränderter Form gemeinhin aus der Gewinnung sehr reiner Alkohole zum Beispiel aus Getreide- oder Fruchtmaischen bekannt.

Das Verfahren hier beruht auf der Trennung der verflüssigten Gase mittels Rektifikation (mehrstufige Gegenstromdestillation) unter erhöhtem Druck und gegebenenfalls niedrigeren Temperaturen als der üblichen Umgebungstemperatur. Gegenüber herkömmlichen Methoden ist es damit möglich, ohne Hilfsstoffe, Abfall und Abwasser und in nur einem Verfahrensschritt sowohl hinreichend reines Kohlendioxid als auch Schwefeldioxid zu erzeugen. Es könnten alle ohnehin für den Oxyfuel-Prozess erforderlichen Prozessschritte, wie die Endkühlung der Verdichterstufen, die Verflüssigung des Kohlendioxids, die Abtrennung der nicht

verflüssigbaren Gase (Sauerstoff, Stickstoff) und die Entschwefelung, in einem Prozessschritt und Apparat vereinigt werden. Über die Bodenzahl und das Rücklaufverhältnis kann die erforderliche Trennwirkung und damit die Reinheit eingestellt werden. Kernkomponente der Versuchsanlage für diese Technologie an der Professur für Kraftwerkstechnik der TU Dresden ist eine einsäulige total-kondensierende Rektifikationskolonne mit acht Glockenböden (Bild 10). Die Kolonne besteht aus austenitischem, rostfreiem Stahl 1.4541, DN125, mit einem Sichtfenster, Druckstufe bis 64 bar, Temperaturbereich zwischen -25°C und $+150^{\circ}\text{C}$ und zwei Probenahme- und Transportbehältern. Ein weiterer Vorteil des Reinigungsverfahrens besteht darin, dass es nicht spezifisch auf einen bestimmten Schadstoff wirkt. Damit ist die gleichzeitige Abtrennung weiterer Stoffe, deren störende Wirkung noch nicht näher betrachtet wurde (Stickoxide, Kohlenmonoxid), jederzeit möglich. Weder ein zusätzlicher Behandlungsschritt noch eine grundlegende Neuauslegung der Gasreinigung sind dafür erforderlich.

Bisher wurden bereits die theoretischen Grundlagen dieser destillativen Gasreinigung für das Oxyfuel-Rauchgas gelegt sowie ein Versuchsstand entwickelt und gebaut. Zurzeit werden Versuche mit künstlichen Gasgemischen durchgeführt. In diesem und im nächsten Jahr sind Arbeiten mit realen Rauchgasen und die Erweiterung um einen Vorverdichter, eine Filterkaskade, einen Membrantrockner, einen Hauptverdichter, einen Kondensator und einen Lagerbehälter für reales verflüssigtes, aus der Staubfeuerungsversuchsanlage stammendes Rauchgas geplant. Diese Art der Gasreinigung stellt eine Alternative mit hohem Potenzial für die Behandlung aller stickstoffarmen Verbrennungsabgase dar und kann ein entscheidender Beitrag zur

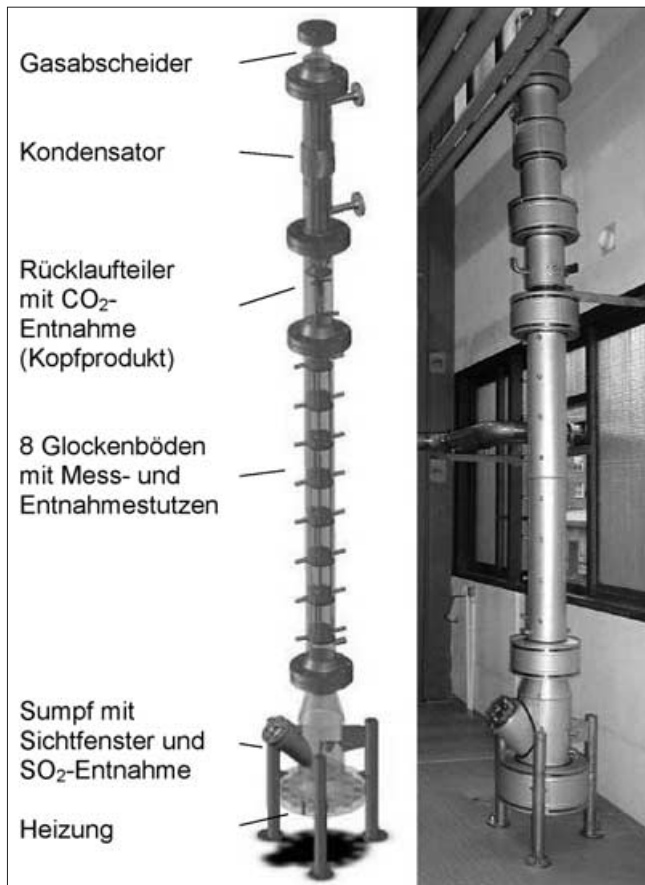


Bild 10. Rektifikationskolonne, Entwurf und Apparat mit Isolierung

Wirtschaftlichkeit des CO₂-freien Kraftwerkes nach dem Oxyfuel-Prozess sein.

Die drei bereits vorhandenen Anlagen – die 50-kW-Staubfeuerungsversuchsanlage, der 30-m³/h-Nasswäscher und die 6-l/h-Rektifikationskolonne – sowie die sich derzeit in Planung befindende Filter-, Trockner- und Verdichterstrecke sind Teil des Anlagenparks der Professur für Kraftwerkstechnik der TU Dresden. Ab dem Jahr 2009 werden diese Anlagen neben einer 300-kW-Wirbelschichtfeuerung (auch Oxyfuel), einem 75-kW-Biomasse-Vergaser, einer modularen 120-kW-Rostfeuerung und -pyrolyseeinrichtung mit Versuchskessel, verschiedenen Pulsationsbrennern für gasförmige und flüssige Brennstoffe von 15 bis 600 kW sowie einem 20-kW-Biomasse-Pelletkessel im bis dahin fertiggestellten Zentrum Energietechnik (ZET) untergebracht sein.

3 Der Weg zum Großkraftwerk

Für den Kraftwerksbereich wurde das Oxyfuel-Verfahren erstmals Anfang der 1980-er Jahre in Betracht gezogen, als man nach Lösungsansätzen für eine mögliche CO₂-Abscheidung suchte. Mittlerweile gibt es zahlreiche Forschungsaktivitäten zum Oxyfuel-Prozess, die sich wegen der höchsten spezifischen CO₂-Emissionen auf Kohlekraftwerke konzentrieren.

Obwohl zum heutigen Zeitpunkt noch nicht alle Fragestellungen abschließend beantwortet sind, wurden mittlerweile erste Oxyfuel-Pilotprojekte für Kohle auf den Weg gebracht, die der Technologieentwicklung Vorschub leisten

werden. Dazu zählt die zur Zeit im Bau befindliche Pilotanlage des Vattenfall-Konzerns am Kraftwerksstandort Schwarze Pumpe mit einer thermischen Leistung von 30 MW, die im Jahr 2008 in Betrieb gehen soll. Bild 11 zeigt eine Standortskizze mit einem Aufstellungsplan der geplanten Anlage. Bei gutem Fortschreiten der Forschungsaktivitäten plant Vattenfall darüber hinaus für das Jahr 2015 ein erstes Demonstrationskraftwerk mit einer elektrischen Leistung von 300 bis 600 MW. Die Umrüstung eines bestehenden Kraftwerksblockes mit einer elektrischen Leistung von 30 MW auf Oxyfuel bis zum Jahr 2009 wird unterdessen vom australischen Betreiber CS Energy verfolgt und soll zur Demonstration der Technologie als Nachrüstooption für bestehende Kohlekraftwerke dienen.

4 Ein Oxyfuel-Kraftwerkskonzept mit CO₂-Abscheidung für Braunkohle

Die Professur für Kraftwerkstechnik befasst sich seit dem Jahr 2003 mit der Technologiebewertung für Oxyfuel-Braunkohlekraftwerke. Im Rahmen des Forschungsprojekts ADECOS wurde ein Simulationsmodell entwickelt, das sämtliche Anlagenteile des Oxyfuel-Kraftwerks beinhaltet. Das braunkohlebefeuerte Oxyfuel-Kraftwerkskonzept besitzt eine Generatorleistung von 1000 MW. Etwa 95 % des bei der Verbrennung erzeugten CO₂ werden abgetrennt, gereinigt und auf 100 bar verdichtet. Die Auswirkungen bestimmter Prozessveränderungen als Ergebnisse von Grundlagenuntersuchungen oder im Zuge der Optimierung können anhand des Simulationsmodells ermittelt werden. Bild 12 zeigt das vereinfachte Verfahrensfließbild und eine Tabelle mit den wichtigsten Daten.

Das Konzept ähnelt in seinen Grundzügen einem konventionellen Dampfkraftwerk. Wichtigste Unterschiede sind die Luftzerlegungsanlage (LZA) zur Sauerstoffproduktion sowie eine Prozesskette zur Konditionierung und Verdichtung des CO₂. Weitere Veränderungen erfährt der Dampferzeuger, hier sei insbesondere die notwendige Rauchgasrezirkulation genannt. Zum Zwecke der Wirkungsgradsteigerung ist außerdem eine Wirbelschicht-Trocknungsanlage mit integrierter Abwärmenutzung (WTA) für die Braunkohle mit einem Rohwassergehalt von über 50 % vorgesehen. Die Vortrocknung auf 12 % Wassergehalt würde bei konventionellen Braunkohlekraftwerken zu einer Erhöhung des Gesamtwirkungsgrades um 4 bis 6 % führen, insbesondere durch die Verringerung der Wasserdampfmenge im Rauchgas. Im Oxyfuel-Prozess wird zusätzlich der bauliche Aufwand für die Wasserentfernung aus dem CO₂ (Rauchgaskondensation) sowie die dabei abzuführende Wärmemenge reduziert, welche nur begrenzt im Prozess genutzt werden könnte. Im Folgenden werden die Hauptkomponenten des Oxyfuel-Braunkohlekraftwerks näher erläutert.

4.1 Luftzerlegungsanlage

Für die Erzeugung der erforderlichen Menge Sauerstoff kommen ausschließlich kryogene Luftzerlegungsanlagen (LZA) in Betracht. Diese besitzen eine hohe Verfügbarkeit und sind technisch sehr ausgereift. Drei der größten derzeit lieferbaren LZA werden gebraucht, um den Tagesbedarf von ca. 13 500 t Sauerstoff mit einer Reinheit von 99,5 Vol.-% bereitzustellen. Die Funktionsweise kryogener Luftzerlegungsanlagen beruht auf der destillativen Trennung von Luft im Tieftemperaturbereich. Vor Eintritt in die Trennkolonne

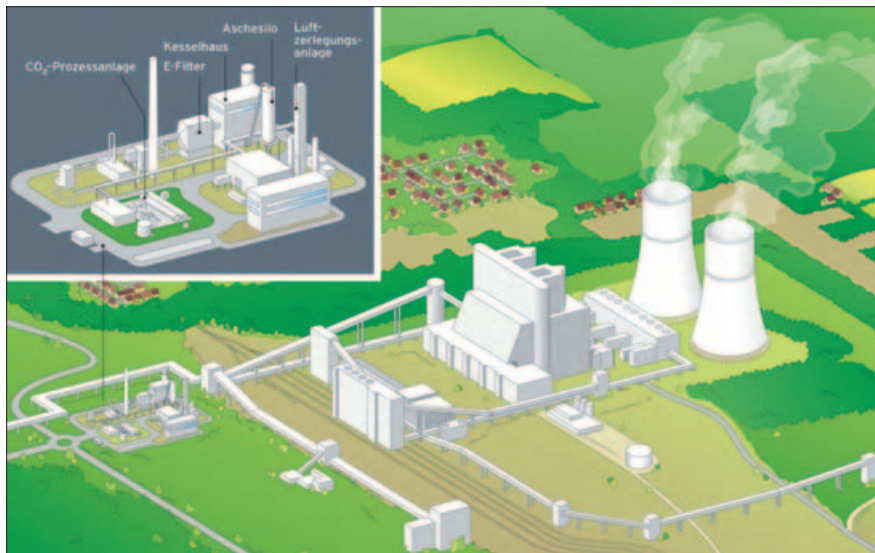


Bild 11. Die geplante 30-MW-Oxyfuel-Pilotanlage am Standort Schwarze Pumpe
(Quelle: Vattenfall)

muss die Luft gereinigt und auf 5,4 bar verdichtet werden. Letzteres erfolgt mit drei Großverdichtern, deren elektrischer Eigenbedarf insgesamt etwa 150 MW beträgt. Allein dies würde einen Wirkungsgradverlust von etwa 8 % für das Gesamtkraftwerk bedeuten. Die Energiebilanz wird jedoch verbessert, indem Verdichterabwärme im Umfang von 115 MW_{th} zur Kondensatvorwärmung im Dampfkraftprozess genutzt wird. Zwar benötigt diese Konfiguration etwas mehr Antriebsleistung für die Luftverdichter, doch überwiegt der thermodynamische Vorteil durch die Abwärmenutzung.

4.2 Dampferzeuger

Ein Dampferzeuger dient der Wärmeübertragung von den heißen Rauchgasen auf den Dampfkraftprozess und beansprucht bei Kohlekraftwerken den größten Anteil der Investitionssumme, was dessen hohen Stellenwert auch bei der Entwicklung des Oxyfuel-Konzepts verdeutlicht. Viele Studien konzentrieren sich dabei auf die notwendigen Veränderungen bei der Umwandlung konventioneller zu Oxyfuel-gefeuerten Dampferzeugern unter Beibehaltung der thermischen Verhältnisse. Es zeigte sich außerdem, dass speziell gestaltete Oxyfuel-Dampferzeuger bei gleicher Kraftwerksleistung sogar kleiner und damit kostengünstiger gebaut werden können.

In kohlebefeuerten Kraftwerken großer Leistung kommen heute meist staubgefeuerte Dampferzeuger zum Einsatz. Jedoch deutet einiges darauf hin, dass im kohlebefeuerten Oxyfuel-Prozess andere Feuerungskonzepte vorteilhafter sein könnten. Hier sind insbesondere die zirkulierende Wirbelschichtfeuerung und die Schmelzkammerfeuerung zu nennen. Während staubgefeuerte Oxyfuel-Dampferzeuger stets eine umfangreiche Rauchgasrezirkulation benötigen, könnte diese bei einer Wirbelschicht zumindest teilweise durch einen erhöhten Umlauf des inerten Bettmaterials ersetzt werden. Bei einer Schmelzkammerfeuerung sind hohe Verbrennungstemperaturen ohnehin erwünscht, damit die Asche in flüssiger Form abgezogen werden kann. So müsste auch hier weniger Rauchgas rezirkuliert werden. Zudem kann das entstehende Schmelzkammergranulat in der Baustoffindustrie Verwendung finden. Jede der angesprochenen Varianten wird im Projekt ADECOS für den Einsatz in einem möglichen Oxyfuel-

Kohlekraftwerk optimiert und anschließend einem gemeinsamen Vergleich unterzogen. Allgemein kann festgehalten werden, dass Oxyfuel-Dampferzeuger kleiner gebaut werden können als konventionelle Dampferzeuger für Kraftwerke gleicher Leistung. Dies hängt mit dem verbesserten Wärmeübergang durch mehr Gasstrahlung (höherer Kohlendioxid- und Wassergehalt im Rauchgas) sowie dem verminderten spezifischen Rauchgasvolumen zusammen. Ein weiterer Faktor ist, dass durch die Einkopplung von Abwärme in den Dampfkraftprozess, beispielsweise aus der Verdichterkühlung der Luftzerlegungsanlage, weniger Dampf produziert werden muss.

Eine besondere Bedeutung kommt bei Oxyfuel-Dampferzeugern der Minimierung des Falschlufteintrags zu. Als dauerhaft technisch realisierbar werden 2 % Falschlufft angesehen, bezogen auf den Rauchgasmassenstrom. Erhöhte Falschluffanteile im Rauchgas sind bei konventionellen Kraftwerken kaum problematisch und wirken sich lediglich in geringem Maße auf den Wirkungsgrad aus. Im Oxyfuel-Prozess führt Falschluff jedoch zu einer direkten Verunreinigung des CO₂ und einem größeren zu verdichtenden Produktgasstrom. Weiterhin sinkt der CO₂-Abscheidungsgrad, da bei der späteren Abtrennung der Störstoffe Sauerstoff, Stickstoff und Argon höhere Kohlendioxid-Verluste auftreten.

Das in Bild 12 dargestellte Oxyfuel-Konzept verfügt über einen staubgefeuerten Dampferzeuger, an dem rund 70 % der Rauchgase zur Temperaturabsenkung bei der Verbrennung rezirkuliert werden. Eine Zusatzheizfläche (ND-Eco) dient zur Vorwärmung von Kondensat aus dem Dampfkraftprozess und zur Senkung der Rauchgastemperatur auf unter 200 °C, bevor die Rauchgasrezirkulation nach dem Elektrofilter abgezweigt wird. Das rezirkulierte Rauchgas wird in Rezirkulationsvorwärmern durch die den Dampferzeuger verlassenden Rauchgase wieder erwärmt, ebenso wie der benötigte Sauerstoff für die Verbrennung. Die beschriebene Konfiguration vereint dabei die Vorteile einer kalten und einer heißen Rezirkulation. So können der Elektrofilter zur Staubentfernung und auch die Rezirkulationsgebläse ohne große thermische Belastungen betrieben werden, während dennoch nur vorgewärmte Gase in die Brennkammer gelangen. Das steigert den Wirkungsgrad.

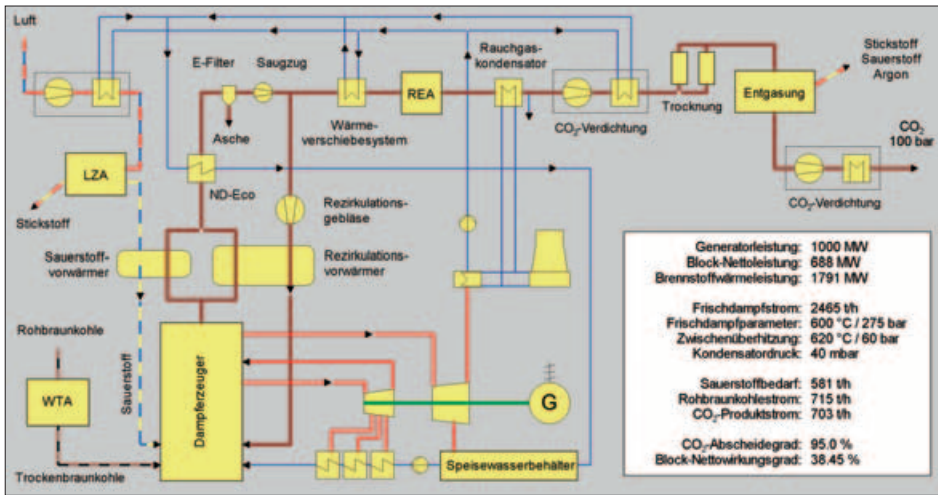


Bild 12. Verfahrensfließbild des Oxyfuel-Kraftwerkskonzepts mit CO₂-Abscheidung

4.3 Rauchgasreinigung und CO₂-Verdichtung

Die Rauchgasbehandlungsanlagen in einem Oxyfuel-Kraftwerk müssen auf die Anforderungen an die Qualität des erzeugten CO₂ abgestimmt sein, die sich aus den möglichen Transportprozessen (z. B. Pipeline) sowie der angestrebten Verbringung ergeben, beispielsweise der Einleitung in saline Aquifere. Nur eine untergeordnete Rolle spielen herkömmliche Emissionsgrenzwerte für Luftschadstoffe, da im Normalbetrieb lediglich geringe Restgasmengen emittiert werden.

In dem Oxyfuel-Konzept aus Bild 12 wird das CO₂ auf einen Druck von 100 bar verdichtet und durchläuft währenddessen mehrere Behandlungsschritte. Nach Abkühlung der Rauchgase bis an den Taupunkt und Einbindung der Wärme in den Dampfkraftprozess erfolgt zunächst eine Entschwefelung der Rauchgase. Hierzu dient ein Nasswäscher, welcher mit Kalksteinsuspension betrieben wird. Der für die Gipsgewinnung notwendige Oxidationsschritt erfolgt dabei in einem externen Behälter, um das CO₂ nicht mit Luft zu verunreinigen. Es folgt ein mit Kraftwerkskühlwasser arbeitender Rauchgaskondensator, in dem der Großteil des im Rauchgas vorhandenen Wassers abgeschieden wird. Anschließend beginnt die Verdichtung des CO₂ bis auf einen Zwischendruck von 35 bar. Analog den Verdichtern der Luftzerlegungsanlage arbeiten diese Verdichterstufen auf einem angehobenen Temperaturniveau, sodass ihre Abwärme in den Dampfkraftprozess eingebunden werden kann. Es folgt eine Restentfeuchtung des vorverdichteten CO₂ in regenerierbaren Adsorptionstrocknern, anschließend tritt das CO₂ in eine Anlage zur Entfernung von Stickstoff, Sauerstoff und Argon ein. Dies erfolgt durch

zweifache Phasentrennung im Tieftemperaturbereich; die erzielbare CO₂-Reinheit hängt dabei vor allem von der Anfangskonzentration des CO₂ ab. Die erforderliche Kälteleistung wird aus einer Entspannung des CO₂ auf 10,5 bar gewonnen. Das gereinigte CO₂ kann nun auf den Enddruck von 100 bar verdichtet werden, wobei diese Verdichterstufen für geringen Leistungsbedarf optimiert und mit Kraftwerkskühlwasser gekühlt sind. Die Gaszusammensetzung während der schrittweisen Reinigung des CO₂ bis zum transportfähigen Produktgas ist in Tabelle 1 zusammengestellt.

4.4 Energetische Bewertung

Das Oxyfuel-Braunkohlekraftwerkskonzept mit CO₂-Abscheidung basiert hinsichtlich Dampfpparametern und Braunkohlevortrocknung auf einer Kraftwerkstechnologie, wie sie in 5 bis 10 Jahren auch für konventionelle Braunkohlekraftwerke Standard sein wird. Bei einer Abscheiderate des erzeugten CO₂ von 95 % wird ein Nettowirkungsgrad von etwa 38,5 % erzielt, inklusive aller Nebenanlagen, der Verdichtung des CO₂ auf 100 bar und unter Einbeziehung realer Verlustbeiwerte. Gegenüber einem modernen Braunkohlekraftwerk mit 43 % Wirkungsgrad werden 94,4 % der CO₂-Emissionen vermieden, wobei der energetische Aufwand für die Emissionsvermeidung einer Tonne CO₂ etwa 135 kWhel beträgt. Auch andere Studien weisen für Oxyfuel-Kohlekraftwerke eine Minderung des Kraftwerkswirkungsgrades von 10 bis 12 % aus, abhängig von der Technologie des konventionellen Vergleichskraftwerks, der Art des Brennstoffs sowie dem reali-

Zusammensetzung (Vol.)	Rohgas feucht	nach Entschwefelung, Wasseranteil kondensiert	CO ₂ -Produktgas
CO ₂	56,3 %	82,2 %	96,0 %
N ₂	6,4 %	9,2 %	2,3 %
O ₂	3,0 %	4,4 %	1,4 %
Ar	0,4 %	0,6 %	0,2 %
H ₂ O	33,5 %	3,7 %	20 ppm
SO ₂	0,44 %	0,03 %	0,04 %

Tabelle 1
Rauchgaszusammensetzung an verschiedenen Stellen der Prozesskette

sierten Abscheidegrad des CO₂ und dessen Reinheit. Als weiterer wichtiger Einflussfaktor wurde außerdem die Falschluftrate identifiziert.

5 Zusammenfassung

An der Professur für Kraftwerkstechnik der TU Dresden werden die Grundlagen des Oxyfuel-Prozesses für Braunkohle erforscht. Neben ersten Ergebnissen zur Technologie-

bewertung für ein Oxyfuel-Braunkohlekraftwerk mit CO₂-Abscheidung wurden technische Herausforderungen sowie der mögliche Aufbau einer solchen Anlage dargestellt. Anhand der durchgeführten Berechnungen und der parallel dazu durchgeführten Versuche konnte gezeigt werden, dass ein solches Kraftwerk wesentlich zur Vermeidung von atmosphärischen CO₂-Emissionen aus der Stromerzeugung beitragen kann.

Manuskripteingang: 2.4.2007

Angenommen am: 15.5.2007



Löser, Jan
Dipl.-Ing.

Studium Energie- und Umwelttechnik von 1990 bis 1996 an der TU Chemnitz ♦ 1996 Studienabschluss als Diplom-Ingenieur ♦ von 1997 bis 2000 Tätigkeit als Inbetriebnahme- und Entwicklungsingenieur und von 2000 bis 2004 als Betriebsleiter ♦ seit 2005 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Energietechnik, Fakultät Maschinenwesen der TU Dresden



Hellfritsch, Stefan
Dipl.-Ing.

Studium Energietechnik von 1997 bis 2003 an der TU Dresden ♦ 2003 Studienabschluss als Diplom-Ingenieur ♦ seit 2003 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Energietechnik, Fakultät Maschinenwesen der TU Dresden



Weigl, Sebastian
Dipl.-Ing.

Studium Energietechnik von 1999 bis 2005 an der TU Dresden ♦ 2005 Studienabschluss als Diplom-Ingenieur ♦ seit 2005 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Energietechnik, Fakultät Maschinenwesen der TU Dresden



Wilhelm, Ronald
Dipl.-Ing.

Studium Umwelt- und Strahlenschutztechnik/ Ressourcenschutz von 1995 bis 1998 an der Berufsakademie Riesa ♦ 1998 Abschluss als Diplom-Ingenieur (BA) ♦ Aufbaustudium Umweltschutz und Raumordnung/Energietechnik von 1998 bis 2002 an der TU Dresden ♦ 2002 Abschluss als Diplom-Ingenieur ♦ ab 2002 Promotionsstudent und seit 2005 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Energietechnik, Fakultät Maschinenwesen der TU Dresden



Klemm, Marco
Dr.-Ing.

Studium Energie- und Umwelttechnik von 1994 bis 1999 an der TU Chemnitz ♦ 2004 Promotion zum Dr.-Ing. ♦ seit 1999 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Energietechnik, Fakultät Maschinenwesen der TU Dresden